Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 13, No. 4, Oct- Nov 2017, p. 446-457

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 13، شماره 4، مهر - آبان 1396، ص. 457-446

اثر نانوفیبر سلولز و کربوکسی‌متیل سلولز بر ویژگی‌های رئولوژیکی و اندازه ذرات مایونز کم‌چربی

لاله گلچوبی[1]- مزدک علیمی[2]- حسین یوسفی[3]

تاریخ دریافت: 1394/07/20
تاریخ پذیرش: 1394/11/24

چکیده

نانوفیبر سلولز (NFC) پلیمر خطی D-گلوکز با مناطق کریستالی و آمورف می‌باشد که به‌صورت توأم با کربوکسی متیل سلولز (CMC) به میزان 0% تا 1% با هدف بهبود خصوصیات رئولوژیکی مایونز کم‌چربی (30% روغن) استفاده گردید. پس از تهیه 5 تیمار، آزمون ویسکوزیته ظاهری روی آنها انجام شد. سپس 3 نمونه منتخب تحت آزمون‌های رئولوژیکی، تعیین اندازه ذرات و میکروسکوپ نوری قرار گرفتند. نمونه حاوی 0/5% نانوفیبر سلولز- 0/5% کربوکسی متیل سلولز با داشتن کوچکترین اندازه ذرات و میزان یکنواختی کمتر از نمونه شاهد تجاری، دارای نزدیکترین مقدار ویسکوزیته ظاهری به ویسکوزیته نمونه شاهد تجاری بود ($p<0/05$). از برازش داده‌ها با مدل هرشل بالکلی مشخص شد که افزودن توأم نانوفیبر سلولز و کربوکسی متیل سلولز موجب تغییر معنادار در شاخص‌های رئولوژیکی مورد بررسی نشد ($p>0/05$). طی آزمون روبش فرکانس، روند تغییرات مدول الاستیک نمونه‌ها در سطحی بالاتر از مدول ویسکوز ($G'>G''$) قرار گرفت و بیانگر تقویت ویژگی‌های الاستیک در آنها بود. با توجه به نتایج آزمون‌ها، تیمار حاوی 0/5% نانوفیبر سلولز- 0/5% کربوکسی متیل سلولز به عنوان بهترین تیمار معرفی گردید.

واژه‌های کلیدی: نانوفیبر سلولز، کربوکسی متیل سلولز، مایونز کم‌چربی، رئولوژی، اندازه ذرات

مقدمه

در طول دهه گذشته، مصرف محصولات غذایی کم‌چربی (LF) به دلیل ازدیاد بیماری‌های قلبی- عروقی و سرطان افزایش چشمگیری داشته است (Liu *et al*, 2007). یکی از فراورده‌های پرچربی (65%-80% وزنی روغن گیاهی) که مصرف زیادی در جهان دارد، سس مایونز می‌باشد که تولید انواع کم‌چربی آن با استقبال فراوانی همراه شده است (Kalashnikova *et al*., 2012). هیدروکلوئیدها در تهیه محصولات کم‌چربی، خواص خوبی از قبیل افزایش پایداری و بهبود شبیه‌سازی چربی در دهان را نشان می‌دهند (Quintana *et al*., 2002; Choonhahirun, 2006). یکی از هیدروکلوئیدهای متداول در فرمولاسیون فراورده‌های کم‌چربی از جمله مایونز، سلولز و مشتقات حاصل از اصلاح فیزیکی آن مانند نانوفیبر سلولز (NFC) می‌باشد (Coffey *et al*., 2006; Lavoine *et al*., 2010). نانوفیبر سلولز به پلیمرهای گلوکز با ضخامت معمول 20-40 نانومتر و طول بلندتر از 5 میکرومتر شامل هر دو مناطق کریستالی و آمورف اطلاق می‌شود که توسط پیوندهای گلوکوزیل β (1-4) به‌هم متصل شده‌اند (Yousefi *et al*., 2011). مقادیر مدول ذخیره ژل‌های نانوفیبریل سلولز بالا بوده و تقریبا بیش از 2 برابر ژل‌های سلولز گزارش شده است. در واقع بالا بودن نسبت ابعاد نانوفیبریل‌ها منجر به افزایش استحکام شبکه ژلی می‌شود و صرف نظر از غلظت سوسپانسیون، مدول ذخیره سوسپانسیون نانو فیبر سلولز تقریباً 10 برابر بیشتر از مدول افت آن گزارش شده است (Paakko *et al*., 2007; Lavoine *et al*., 2010). این مدول ذخیره بالا، به دلیل طویل بودن فیبریل‌ها می‌باشد که به‌طور ذاتی یک ساختار شبکه‌ای درگیر را تشکیل داده و می‌توانند سبب کاربرد زیاد آن به‌عنوان یک قوام‌دهنده، پایدارکننده بدون کالری سوسپانسیون‌ها و یا ژل‌کننده در انواع گسترده‌ای از محصولات غذایی گردد (Bogati, 2011). کربوکسی متیل‌سلولز (نمک سدیم) یک پلیمر آنیونی، خطی و محلول در آب است که مشتق حاصل از اصلاح شیمیایی سلولز بوده و از تیمار قلیایی سلولز با کلرو استیک‌اسید به‌دست می‌آید (Coffey *et al*., 2006). کربوکسی متیل سلولز به دلیل داشتن خواص قوام‌دهندگی و امولسیفایری در مایونز و سس‌های سالاد مورد استفاده

1 و2- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات آیت‌الله آملی
3- استادیار، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
(* - نویسنده مسئول: Email: Ahooora_mazdak@yahoo.com)
DOI: 10.22067/ifstrj.v1395i0.50555

قـرار مـی‌گیـرد (McClements, 2005). بـه دلیـل ماهیـت بسـیار آبدوسـت مشـتقات فیزیکـی سـلولز، اغلـب مطالعـات روی پایـداری امولسیون‌های روغن در آب به ویژه سس‌های سالاد یـا مـایونز کـم کالری و بدون کالری، توسط میکرو کریسـتالین سـلولز (MCC) یـا نـانوفیبر سـلولز انجـام شـده اسـت (McGinley *et al*., 1997; Kalashnikova *et al*., 2012; Winuprasith & Suphantharika, 2015). با این حال، اطلاعات قابـل دسترسـی از کاربرد مخلوط نانوفیبر سلولز و کربوکسی‌متیـل سـلولز وجـود نـدارد. هدف از این پژوهش بررسی اثرات افزودن نانوفیبر سلولز و کربوکسی متیل‌سلولز بر ویژگی‌های رئولوژیکی و اندازه ذرات مایونز کم‌چربی و مقایسه توانایی هر یک از آنها به تنهـایی و مخلـوط آنهـا، در پایـدار نمودن این امولسیون کم‌چربی بوده است.

مواد و روش‌ها

مواد

در این تحقیق از ژل 3% نانوفیبر سـلولز تولیـد شـده از ضـایعات کشـاورزی توسـط شـرکت دانـش بنیـان نـانو نـوین پلیمـر (قطـر متوسـط 10±32 نـانومتر و طـول بیشـتر از 5 میکرومتـر (کاتـالوگ محصول))، کربوکسی‌متیل سلولز تولید شرکت سانروز ژاپن، نشاسـته اصلاح شده (E-1422) ذرت مومی پیش ژلاتینه شرکت روکت با نام تجاری پرگفلو CH_2O تولید کشور فرانسه و مواد تشکیل‌دهنده مایونز فراهم شده توسط شرکت غذایی بهروز نیک استفاده گردید.

تهیه و آماده‌سازی فاز آبی حاوی ژل نانو فیبر سلولز

مقدار نانوفیبر سلولز هر فرمول با میـزان آب مربـوط بـه همـان فرمول، مخلوط و روی هیتر قرار گرفتند تا توأم با همـزدن، مخلـوط یکنواخت به جوش آید و به مدت 7 دقیقه در ایـن دمـا پاسـتوریزه و نهایتاً تا دمای اتاق خنک شد (Alimi *et al*., 2013). وزن مخلـوط قبل و بعد از پاستوریزاسیون، تعیین شد و تفاوت وزن حاصل از تبخیر، در حین تهیه امولسیون سس مایونز به‌صورت آب به فرمـول افـزوده گردید.

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های مایونز

جهت تهیه نمونه‌های مایونز، کربوکسی متیل سلولز مورد استفاده برای هر فرمول به همراه مواد پودری مربوطه، بکار برده شد. پـس از توزین مواد پودری (شکر- 5/7٪، نمـک= 2٪، پـودر خـردل= 0/5٪، بنزوات سدیم= 0/04٪، سوربات پتاسـیم= 0/03٪، اسـید سـیتریک= 0/1٪ و نشاسته فرایند سرد= 1/8٪) و کربوکسی متیل سـلولز، ابتـدا زرده تخم‌مرغ (5٪) و مقدار 10% از روغن به میکسر آزمایشگاهی (60 کیلوگرمی، ارکان فلز، ایران) افزوده شد و سپس به‌ترتیب، تمام مـواد پودری و حدود یک سوم از فاز آبی (نانوفیبر سلولز و آب) به آن اضافه گردید. در نیمه فرآیند، یک سوم بعدی فاز آبی و باقی‌مانده روغن نیز اضافه گردید. کل روغن فرمولاسیون =30٪، به تدریج طـی مـدت 6 دقیقه به امولسیون مایونز افزوده شد. نهایتاً با اتمام روغن، یک سـوم پایانی فاز آبی و در آخر نیز سرکه فرمولاسیون (سـرکه 11 درصـد= 4/8%) به مخلوط اضافه گردیـد و بـه مـدت 1 دقیقـه همـزده شـد (Alimi *et al*., 2013). آنگاه نمونه‌های تولید شده با مقادیر مختلف نانوفیبرسلولز و کربوکسی‌متیل سلولز، مطـابق جـدول (1) کدگـذاری شدند. نمونه شاهد، مایونز کم‌چربی تجاری (30% روغن) شرکت بهروز نیک بود.

جدول 1- مقادیر هیدروکلوئیدهای موجود در نمونه‌های مایونز کم چربی

کد نمونه	مقدار نانو فیبر سلولز (%0-1)	مقدار CMC (%0-1)
NFC100	1	0
NFC75/CC25	0/75	0/25
NFC50/CC50	0/50	0/50
NFC25/CC75	0/25	0/75
CC100	0	1
Commercial Control	0	0

آزمون تعیین ویسکوزیته ظاهری

جهت اندازه‌گیری ویسکوزیته تمامی نمونه‌هـای سـس مـایونز از دستگاه ویسکومتر دورانی ویسکوتچ (اسپانیا) با اسپیندل دیسکی R5 با سرعت 60 دور در دقیقه و دمای 23-20 درجه سانتی‌گراد در طـی مدت زمان 20 دقیقه استفاده گردید (Alimi *et al*., 2013).

قابل ذکر است که نمونه‌های مایونز کم‌چربی در یک مرحله تولید شـدند و پـس از یـک هفتـه نگهـداری در دمـای یخچـال، تحـت آزمون‌های مختلف با دو بار تکرار قرار گرفتند. همچنین آزمون‌هـای

بررسی رفتار جریان، نوسانی (کرنش متغیر و فرکانس متغیر)، تعیین اندازه ذرات و میکروسکوپ نوری تنها روی 3 نمونه منتخب و نمونه شاهد تجاری صورت گرفت.

آزمون بررسی رفتار جریان و آزمون نوسانی

این آزمون‌ها توسط دستگاه رئومتر آنتون پار مدل MCR 501 (اتریش) با 2 صفحه موازی زبر[1] قطر صفحه 25 میلی‌متر و فاصله ایجاد شده بین دو صفحه 1 میلی‌متر روی 3 نمونه منتخب و نمونه شاهد تجاری، در دمای 24-23 درجه سانتی‌گراد انجام شد. جهت کنترل دما، نمونه‌ها قبل از آزمون در انکوباتور با دمای 24 درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند (Alimi *et al*., 2013). در آزمون رفتار جریان طبق معادله (1) از مدل هرشل بالکی و محدوده نرخ برش $^{-1}$200S - 0/01 استفاده گردید.

$$\tau = \tau_y + k \times \gamma^{n} \qquad (1)$$

τ: تنش برشی، τ_y: تنش تسلیم، k: ضریب قوام، γ: سرعت برشی و n: شاخص رفتار جریان است.

آزمون‌های نوسانی نیز بر دو نوع آزمون کرنش متغیر و آزمون فرکانس متغیر بوده است. آزمون کرنش متغیر در کرنش متغیر 100-0/01% و فرکانس ثابت 1 هرتز، به‌منظور تعیین ناحیه ویسکوالاستیک خطی انجام شد. سپس آزمون فرکانس متغیر در منطقه ویسکوالاستیک خطی، در مقدار کرنش ثابت 0/4% و فرکانس متغیر 100-0/01 هرتز صورت پذیرفت (Alimi *et al*., 2013).

آزمون تعیین اندازه ذرات

در این آزمون از دستگاه آنالیزگر اندازه ذرات مالورن 2000 مدل Ver. 5.1 (انگلیس) و حلال آب مقطر، نور لیزر با طول موج 634 نانومتر و سل نمونه کوارتز در دمای 23-20 درجه سانتی‌گراد استفاده گردید و میانگین قطر ذرات نمونه‌ها به‌صورت درصد حجمی- سطحی ارائه شد (Worrasinchai *et al*., 2006).

$$(d_{4,3} = \sum n_i d_i^4 / \sum n_i d_i^3) \qquad (2)$$

میکروسکوپ نوری

در این آزمون از میکروسکوپ نوری جناور مدل کارل زئیس (آلمان) ، لنز شماره 10 و بزرگنمایی 100 میکرومتر جهت گرفتن تصاویر میکرومتری از ذرات پخش شده در نمونه‌ها استفاده شد. طی این آزمون، مقدار بسیار اندکی از هر نمونه بر روی لام گسترش یافته و سپس بر روی جایگاه مخصوص لام، موجود در زیر لنز میکروسکوپ نوری قرار گرفت. با توجه به میزان وضوح تصاویر و اندازه قطرات فاز پراکنده امولسیون، لنز مورد نظر انتخاب گردیده و گرفتن عکس‌ها صورت پذیرفت. در گرفتن عکس‌ها نباید تاخیر زیادی نمود. زیرا نمونه‌های گسترش یافته بر روی لام، خشک شده و تصاویر وضوح خوبی نخواهند داشت.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

به‌منظور تجزیه و تحلیل آماری نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های مختلف، از نرم‌افزار MINI TAB 16 استفاده شد و تجزیه و تحلیل‌ها منطبق با طرح کاملا تصادفی متعادل و در سطح احتمال خطای 0/05 انجام گرفت. با استفاده از این نرم‌افزار ابتدا نرمال بودن نتایج بررسی شد. سپس اگر نتایج بر منحنی توزیع نرمال منطبق بودند، از آزمون پارامتری آنالیز واریانس ANOVA و در صورت عدم انطباق، از آزمون غیرپارامتری کروسکال- والیس جهت بررسی تفاوت معنی‌دار بین داده استفاده گردید. بررسی معنادار بودن میانگین نتایج نمونه‌ها با یکدیگر نیز با استفاده از آزمون Tukey's pairwise comparision انجام شد (Alimi *et al*., 2013).

نتایج و بحث

ویسکوزیته ظاهری

طبق جدول (2) تمامی نمونه‌های حاوی کربوکسی‌متیل‌سلولز دارای اختلاف معنی‌دار و ویسکوزیته ظاهری کمتری نسبت به نمونه شاهد تجاری بودند ($p<0/05$). به‌طوری که از میان این نمونه‌ها، بالاترین و نزدیکترین میزان ویسکوزیته ظاهری به ویسکوزیته نمونه شاهد تجاری، در نمونه حاوی 0/5% نانوفیبر سلولز - 0/5% کربوکسی‌متیل‌سلولز (NFC50/CC50) و کمترین میزان آن در نمونه حاوی 1% کربوکسی‌متیل‌سلولز (CC100) دیده شد. از مقایسه دو نمونه حاوی 1% نانوفیبر سلولز و 1% کربوکسی متیل سلولز (NFC100 و CC100) می‌توان دریافت که خاصیت قوام‌دهندگی نانوفیبر سلولز بیشتر از کربوکسی‌متیل‌سلولز می‌باشد. در واقع نانوفیبر سلولز همانند میکروکریستالین سلولز (MCC) از مشتقات اصلاح فیزیکی سلولز بوده و به دلیل داشتن هر دو منطقه کریستالی و آمورف، قابلیت جذب آب بیشتری نسبت به میکرو کریستالین سلولز دارد. در واقع مناطق آمورف نانوفیبر سلولز به دلیل کاهش اتصالات داخل مولکولی، قادر به ایجاد پیوندهای هیدروژنی بیشتری با مولکول‌های آب می‌باشند (Coffey *et al*., 2006; Yousefi *et al*., 2011). در حالیکه کربوکسی‌متیل‌سلولز جزء هیدروکلوئیدهای با قابلیت ایجاد ویسکوزیته کم بوده (Rajah, 2002) و به‌طور کلی با افزایش کربوکسی‌متیل‌سلولز، ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های مایونز روند کاهشی داشته است. از سوی دیگر Ahola (2008) نیز نتایج مشابهی را در مورد اینترکشن نانوفیبرسلولز با پلیمرهای آنیونی (CMC) گزارش نموده است. او دریافت که اینترکشن نانوفیبریل‌های سلولز مشابه اینترکشن فیبرهای سلولز بوده اما ساختار ژل‌مانند و

گستردگی منطقه سطحی ویـژه نانوفیبریـل‌هـا، بـر روی بسـیاری از پدیده‌های بین سطحی آنها از قبیل متورم شدن و جذب پلیمرهـا بـر روی سطوح، اثر می‌گذارد. به‌طوریکه کربوکسی‌متیـل‌سـلولز مقـداری دافعه الکتروستاتیک به سلولز داشته و جذب غیرقابل برگشت آن روی سـلولز، نیازمنـد دمـای بـالاتر مـی‌باشـد. در واقـع افـزودن کربوکسی‌متیل‌سلولز به محلول‌های نانوفیبر سلولز در مقایسه با یـک پلیمر خنثی، اثر پراکنده شدن و ایجاد ویسـکوزیته کمتـری را نشـان می‌دهد. آزمون‌های هیدرودینامیکی پلی‌ساکاریدهای جذب شـده بـر روی نانوفیبر سلولز توسط Eronen و همکاران (2010) نیز نشان داد که ضخامت لایه کربوکسی‌متیل‌سلولز جذب شده توسط نانوفیبرسلولز بسیار کمتر از ضخامت لایه پلیمر خنثی جذب شده بر روی آن بـوده که متعاقبا موجب اتصال مقدار کمتری از آب با ایـن پلـی‌سـاکارید و ایجاد قوام کمتر در فاز پیوسته آبی گردید. به‌نظر می‌رسد تنها نمونـه حـاوی 0/5% نـانوفیبر سـلولز- 0/5% کربوکسـی‌متیـل‌سـلولز (NFC50/CC50) بـه دلیـل اینترکشـن سینرژیسـتی مناسـب بـین نانوفیبرسـلولز و کربوکسـی‌متیـل‌سـلولز در مقـدار 0/5%، توانسـته ویسـکوزیته بـالاتری را نسـبت بـه سـایر نمونـه‌هـای حـاوی کربوکسی‌متیل‌سلولز نشان دهد.

جدول 2- نتایج آزمون ویسکوزیته ظاهری نمونه‌های مایونز کم‌چربی

کد نمونه	ویسکوزیته (mPa.s)
NFC100	3970 ± 70/7 [c]
NFC75/CC25	3435 ± 120/2[c]
NFC50/CC50	4525 ± 77/8 [b]
NFC25/CC75	1945 ± 49/5 [d]
CC100	1405 ± 35/4 [e]
Commercial Control	5150 ± 14/1 [a]

نتایج به‌صورت میانگین ± انحراف معیار گزارش شده و مقادیر با حرف فوقانی مشابه، اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند ($p>0/05$).

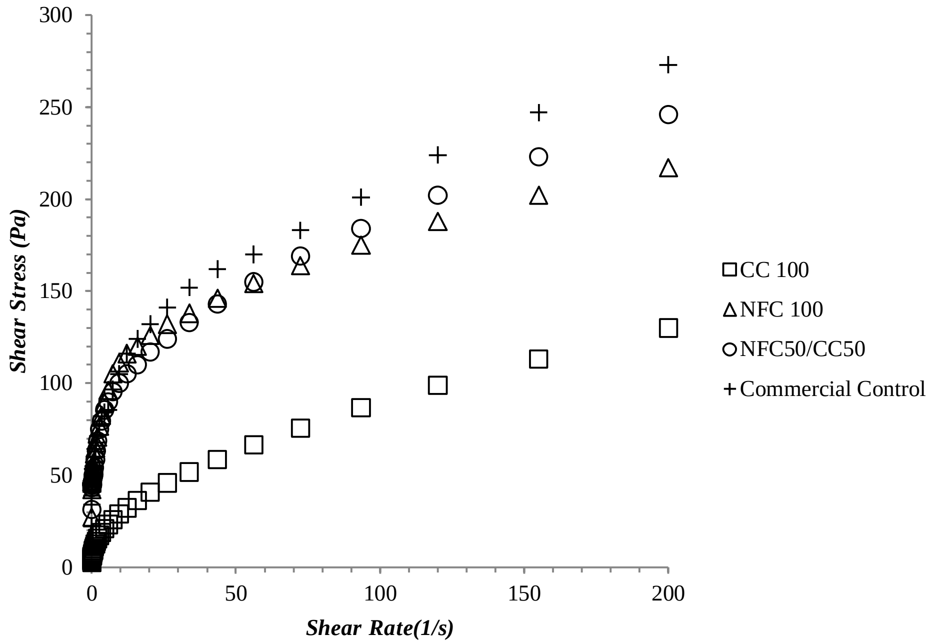
ویژگی‌های رئولوژیکی

نتایج بررسی آزمون رفتار جریان

طبق منحنی رفتار جریان شکل (1)، همه نمونه‌های مایونز رفتار رقیق‌شونده با برش یا سودوپلاستیسیته نشان دادنـد کـه مطـابق بـا یافته‌های قبلی بود (Ma & Barbosa-Canovas, 1995; Mun *et al*., 2009; Su *et al*., 2010). این رفتـار جریـان نتیجـه تخریـب شبکه ژلی ناشی از هیدروکلوئیدها در فاز پیوسته آبی بوده که نهایتـاً منجر بـه کـاهش ویسـکوزیته ظـاهری و تشـدید سودوپلاستیسـیته می‌شود. در واقع در امولسیون‌های متراکم، قطرات به اندازه کافی بـه یکدیگر نزدیک شده و اینترکشن آنها با یکـدیگر منجـر بـه تشـکیل شبکه سه‌بعدی قطرات تجمع یافته می‌گردد. زمانی که سرعت برشی افزایش می‌یابد، نیروهای هیدرودینامیک موجب می‌شـوند تـا تجمـع قطرات، شکل خود را از دست داده و حتی شکسته شوند که این پدیده سبب کاهش ویسکوزیته می‌گـردد (Worrasinchai *et al*., 2006; Thomareis & Chatziantoniou). Mun *et al*., 2009 نیـز گزارش کردند که کربوکسی‌متیل‌سلولز در غلظت‌های کمتـر از 2/3% سبب ایجاد خواص سودوپلاستیک در ژل‌های امولسیونی می‌شود که با رفتار جریان ناشی از بکارگیری غلظت 1% کربوکسی‌متیل‌سـلولز و کمتر از آن، در این پژوهش مطابقـت داشـته اسـت. در مـورد نمونـه NFC100 که شامل 1% نانوفیبر سلولز بوده، بایـد گفـت کـه رفتـار رقیق‌شوندگی با برش سوسپانسیون نانوفیبر سلولز بکار رفته در آن نیز در القاء این رفتار جریان به نمونه مایونز مذکور تـاثیر زیـادی داشـته است (Coffey *et al*., 2006). مشاهده رفتار رقیق‌شوندگی با بـرش در نمونه حاوی 0/5% نانوفیبر سلولز- 0/5% کربوکسـی‌متیـل‌سـلولز (NFC50/CC50) نیز با توجه به استفاده توام دو هیدروکلوئید دارای خصوصیت رقیق‌شوندگی با برش، دور از انتظار نبوده است.

نتایج این آزمون با مدل هرشـل بـالکلی تطبیـق داده شـده و در جدول (3) آمده است. R^2 یا ضریب تبیین نمونه‌هـا نیـز در محـدوده 0/989 تا 0/996 قرار داشته که حاکی از انطباق نتایج بـا ایـن مـدل ریاضی می‌باشد. نمونه‌هـای NFC100 و NFC50/CC50 اخـتلاف معنی‌داری با نمونه شاهد تجاری نداشته و دارای تنش تسلیم بـالایی بودند ($p<0/05$) اما نمونه CC100 دارای اختلاف معنی‌داری با نمونه شاهد تجاری بوده و تنش تسـلیم کمتـری داشـت ($p<0/05$). تـنش تسلیم هنگام استفاده از مایونز به‌عنوان چاشنی سـالاد، یـک ویژگـی مهم می‌باشد. زیرا مایونز باید از توانایی مناسـبی جهـت عـدم سـیال شدن بر روی سطح سالاد برخوردار باشد (Liu *et al*, 2007). به‌نظر می‌رسد ژل نانوفیبر سلولز دارای تنش تسلیم بالایی بـوده و افـزودن کربوکسی‌متیل‌سلولز نتوانسته اثر چندانی بر این قابلیت نانوفیبرسـلولز در نمونه NFC50/CC50 بگذارد. در ارتباط با k یا ضریب قوام که با ویسکوزیته ظاهری رابطه نزدیکی دارد، هیچ یـک از نمونـه‌هـا دارای

اختلاف معنی‌داری با نمونه شاهد تجاری نبودند (p>0/05) اما نمونه CC100دارای مقادیر پایینتر ضریب قوام بوده و با نتایج آزمون ویسکوزیته ظاهری مطابقت داشت. *n* یا اندیس رفتار جریان بیانگر چگونگی رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها می‌باشد که در تمامی نمونه‌ها کوچکتر از 1 و نشان‌دهنده رفتار غیرنیوتنی و رقیق‌شوندگی با برش بوده و اختلاف معنی‌داری در بین آنها و نمونه شاهد تجاری دیده نشد (p>0/05). تطابق این نتایج با نمودارهای شکل (1) و (2) به وضوح قابل مشاهده است. این اثر هیدروکلوئیدها روی ویژگی‌های سودوپلاستیک مایونز پیش‌تر توسط Alimi و همکاران (2013)، Nikzade و همکاران (2012)، Izidoro و همکاران (2008)، گزارش شده بود. از مقایسه نتایج جدول (3) و شکل (1) می‌توان گفت که از بین نمونه‌های حاوی هیدروکلوئید، روند مقادیر اندیس رفتار جریان در نمونه CC100 افزایش یافته و رفتار رقیق‌شوندگی با برش شاخصی از خود نشان نداده است.



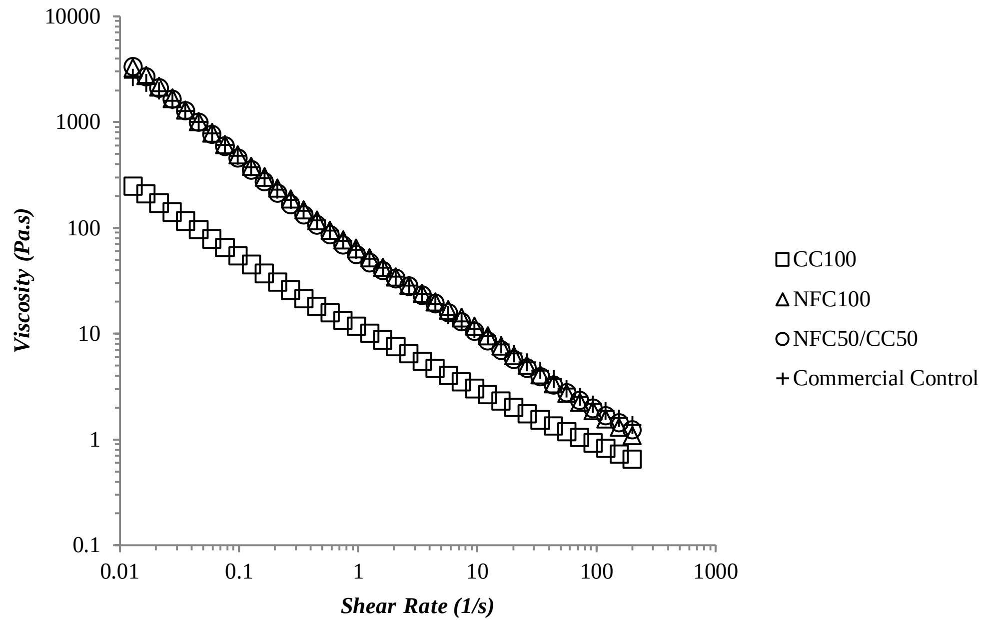
شکل 1- روند تغییرات تنش برشی نسبت به سرعت برشی نمونه‌های مایونز کم چربی

جدول 3- ویژگی‌های رئولوژیکی و شاخص‌های تعیین و توزیع اندازه ذرات نمونه‌های مایونزکم‌چربی

کد نمونه	τ_y (Pa)	*k* (Pa. S^n)	*n*	D[4,3]	یکنواختی
NFC100	30/1 ±2/5^{a}	28/1 ±9/3^{ab}	0/3 ±0/05^{a}	61/4±0/14^{b}	1/55±0/01^{c}
NFC50/CC50	30/4±7/1^{a}	30/4 ±10/4^{a}	0/3 ±0/05^{a}	31/7±0/14^{d}	1/70±0/01^{b}
CC100	11/1 ±1/2^{b}	20/9 ± 0/9^{b}	0/4 ±0/06^{a}	73/8±0/14^{a}	1/88 ±0/01^{a}
Commercial Control	42/1 ±0/3^{a}	25/6±1/0^{ab}	0/3 ±0/01^{a}	45/3±0/14^{c}	1/40±0/01^{d}

نتایج به صورت میانگین ± انحراف معیار گزارش شده و مقادیر با حرف فوقانی مشابه، اختلاف معناداری با یکدیگر ندارند (p>0/05).

همچنین طبق شکل (2)، با افزایش سرعت برشی از 1/s 200-0/01، ویسکوزیته تمامی نمونه‌ها کاهش یافته است که بیانگر رفتار سودوپلاستیکی یا رقیق‌شوندگی با برش تمامی نمونه‌ها و تاییدکننده نتایج جدول (3) می‌باشد (Worrasinchai *et al*., 2006). مطابق با این شکل، نمونه CC100 کمترین ویسکوزیته را نشان داده که مطابق نتایج اندازه‌گیری ویسکوزیته ظاهری در جدول (2) نیز مطابق بود.

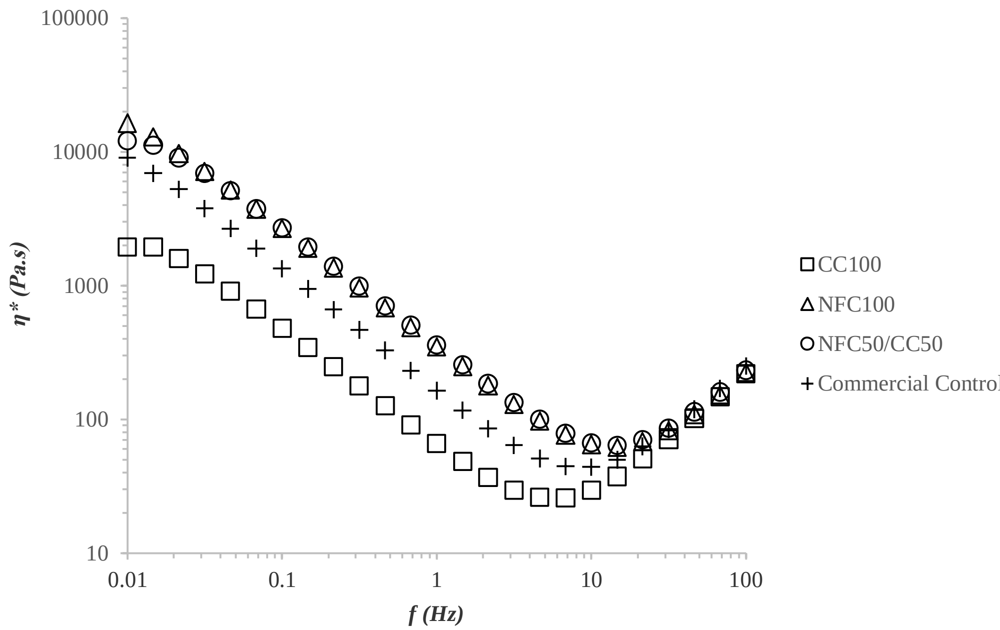


شکل 2- روند تغییرات ویسکوزیته نسبت به سرعت برشی نمونه‌های مایونز کم چربی

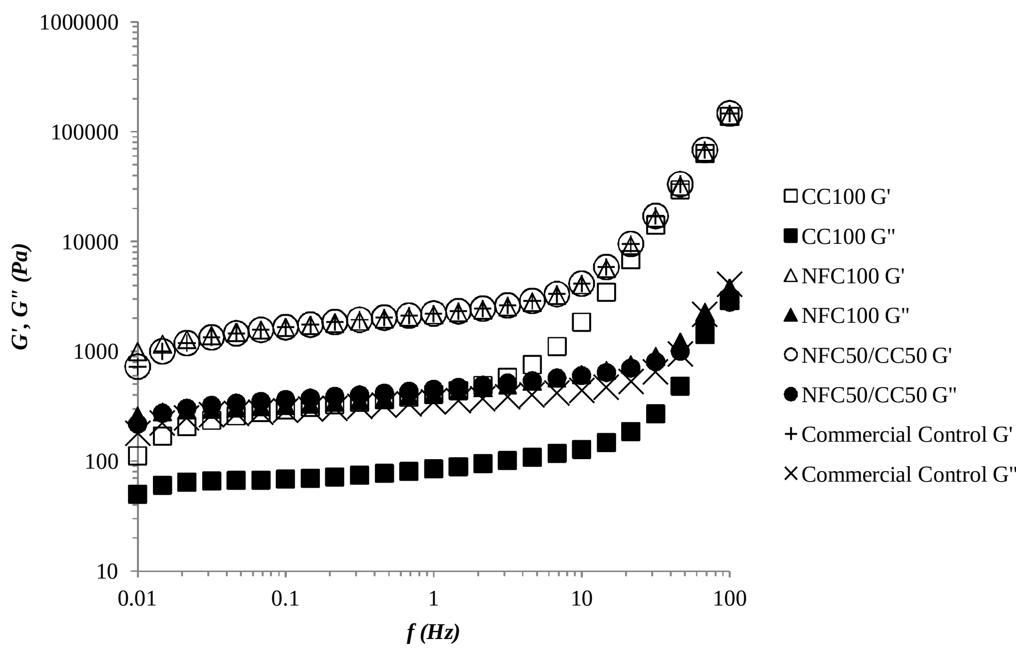
آزمون نوسانی و ویژگی‌های ویسکوالاستیک

در تمامی نمونه‌ها، ویسکوزیته حاصل از افزایش سرعت برشی کمتر از ویسکوزیته کمپلکس (η^*) حاصل از آزمون روبش فرکانس می‌باشد. زیرا آزمون فرکانس متغیر در منطقه ویسکوالاستیک خطی انجام گردیده که موجب به حداقل رساندن تخریب ساختار سه بعدی نمونه‌ها شده است (Worrasinchai *et al*., 2006). طبق روند تغییرات ویسکوزیته کمپلکس (η^*) نسبت به فرکانس در شکل (3) با افزایش فرکانس، ویسکوزیته کمپلکس کاهش یافته و رفتار سودوپلاستیک یا رقیق‌شوندگی با برش نمونه‌ها کاملاً مشهود می‌باشد. در تمامی فرکانس‌ها، روند تغییرات ویسکوزیته کمپلکس نمونه‌های حاوی 1% نانوفیبر سلولز و 0/5% نانوفیبر سلولز - 0/5% کربوکسی‌متیل سلولز (NFC100 و NFC50/CC50) به‌هم و به نمونه شاهد تجاری نزدیک بوده است. در حالیکه نمونه حاوی 1% کربوکسی‌متیل‌سلولز (CC100) کمترین میزان ویسکوزیته کمپلکس را در تمامی فرکانس‌ها، در مقایسه با سایر تیمارها نشان داده است. این نتیجه در تصدیق نتایج آزمون ویسکوزیته ظاهری در جدول (2) و روند تغییرات ویسکوزیته با سرعت برشی در شکل (2) برای نمونه حاوی 1% کربوکسی‌متیل‌سلولز بوده است.

طی آزمون کرنش متغیر، روند تغییرات مدول الاستیک یا ذخیره (G′) و مدول ویسکوز یا افت (G″) نسبت به کرنش (100-0/01%) در فرکانس ثابت 1 هرتز بررسی شد و میزان کرنش در منطقه ویسکوالاستیک خطی 0/5% بدست آمد که به منطقه تعیین شده برای مایونزهای کم‌چربی در تحقیق Alimi و همکاران (2013) بسیار نزدیک بوده است (0/4%). با توجه به شکل (4) که نمایانگر نتیجه آزمون فرکانس متغیر نمونه‌ها می‌باشد، در تمامی نمونه‌ها روند تغییرات مدول الاستیک (G') بالاتر از مدول ویسکوز (G'') بوده که بیانگر رفتار غالب الاستیک در نمونه‌ها می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه در محدوده فرکانس مورد آزمون (100-0/01 هرتز)، هر دو مدول وابستگی زیادی به تغییر فرکانس نشان دادند می‌توان تمامی آنها را به‌عنوان ژل ضعیف طبقه‌بندی نمود (Lorenzo *et al*, 2008).رفتار ژل‌مانند نمونه‌ها نسبت به فرکانس را می‌توان به ساختار سه‌بعدی ژلی ناشی از درگیری‌های فیزیکی در میان زنجیره‌های پلیمری و اینترکشن سینرژیستی بین دو هیدروکلوئید نسبت داد (Lorenzo *et al*., 2008). ویژگی‌های ژل ضعیف مایونز در محدوده فرکانس 100-0/01 هرتز توسط Alimi و همکاران (2013)، 100-0/1 هرتز توسط Worrasinchai و همکاران (2006) و 10-0/1 هرتز توسط Mancini و همکاران (2002) گزارش شده بود. به‌طور کلی انتظار می‌رود که امولسیون‌ها با میزان روغن زیاد، مقادیر G' بالایی نشان دهند (Ma & Barbosa-Canovas, 1995) که در این پژوهش اثر کاهش میزان چربی توسط جایگزین نمودن چربی با نانوفیبرسلولز و کربوکسی‌متیل‌سلولز در فرمولاسیون متعادل گردید.



شکل 3- تغییرات ویسکوزیته کمپلکس نمونه‌های مایونز کم‌چربی نسبت به فرکانس



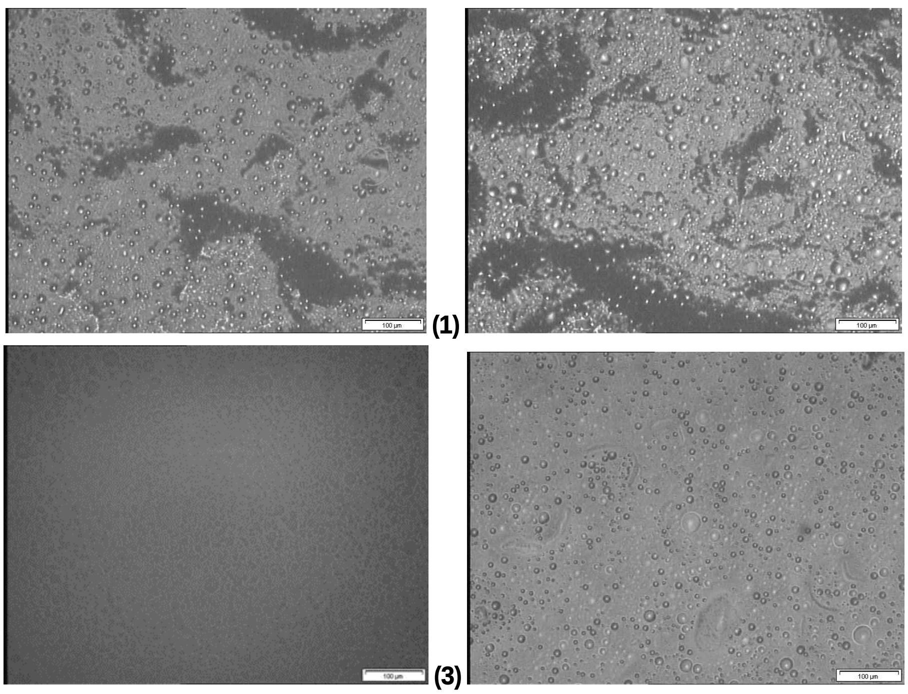
شکل 4- تغییرات مدول ذخیره و افت نمونه‌های مایونز کم‌چربی نسبت به فرکانس

در واقع این هیدروکلوئیدها به ساختار ژلی مایونزها استحکام بخشیدند و سبب افزایش مدول الاستیک آنها شدند (Worrasinchai *et al.*, 2006). البته باید توجه شود که نمونه‌های حاوی نانوفیبر سلولز (NFC100 و NFC50/CC50) دارای مدول

الاستیک (G') بیشتر از نمونه حاوی کربوکسی‌متیل‌سلولز (CC100) بودند. زیرا نانوفیبر سلولز با داشتن خواص ذاتی جالبی از قبیل نسبت سطح به حجم بالا، انعطاف‌پذیری، گروه‌های هیدروکسیل زیاد در سطح و بالا بودن ظرفیت نگهداری آب می‌تواند در غلظت پایین، ژل‌هایی با مقادیر مدول الاستیک بالا تشکیل دهد که منجر به افزایش استحکام شبکه ژلی می‌شود (Ahola, 2008). Paakko و همکاران (2007) نیز طی مطالعات خود گزارش کردند که صرف نظر از غلظت سوسپانسیون، مدول الاستیک سوسپانسیون نانوفیبر سلولز تقریباً 10 برابر بیشتر از مدول افت آن می‌باشد. تمامی این ویژگی‌های نانوفیبر سلولز توانسته بر ویژگی‌های ویسکوالاستیک نمونه‌های مایونز حاوی آن تاثیرگذار باشد

تعیین و توزیع اندازه ذرات

طبق شکل (4) و جدول (3) نمونه CC100 که دارای کمترین مقادیر G' و G'' بوده، نسبت به دیگر نمونه‌ها حاوی ذرات با اندازه بزرگتر بوده است. این یافته‌ها با نتایج Worrasinchai و همکاران (2006)، Langton و همکاران (1999) مطابقت داشته است. Langton و همکاران (1999) با اندازه‌گیری مقادیر G' در ناحیه ویسکوالاستیک خطی دریافتند حضور قطرات ریزتر فاز پراکنده روغن، موجب تقویت ویژگی‌های جامد الاستیک در مایونز می‌گردد، در حالیکه مایونز حاوی قطرات بزرگتر روغن، ویژگی‌های مایع مانند (ویسکوز) بیشتری بروز دادند. این نتیجه به‌طور تقریباً مشابه در نمونه‌های مایونز کم‌چربی این پژوهش مشاهده گردید.



(1) (2) (3) (4)

شکل 5- تصاویر میکروسکوپی مایونزها (1) NFC100، (2) NFC50/CC50، (3) CC100، (4) COMMERCIAL CONTROL

علاوه بر اندازه ذرات، یکنواختی ذرات نیز عامل مهمی به‌شمار می‌آید. بدین صورت که ویسکوزیته امولسیون‌های غیر یکنواخت (پلی‌دیسپرس) به میزان زیادی کمتر از ویسکوزیته امولسیون‌های یکنواخت (مونودیسپرس) با همان نسبت حجمی می‌باشد Gutierrez (*et al*., 2002). از اینرو نمونه حاوی 0/5% نانوفیبر سلولز - 0/5% کربوکسی‌متیل‌سلولز اگر چه کوچکترین اندازه ذرات را داشته ($p<0/05$) اما به دلیل اینکه میزان یکنواختی آن کمتر از نمونه شاهد تجاری بوده، طبق جدول (2) میزان ویسکوزیته ظاهری کمتری را نسبت به نمونه شاهد تجاری نشان داده است. بعد از نمونه NFC50/CC50 به‌ترتیب نمونه‌های شاهد تجاری و NFC100 دارای اندازه ذرات کوچکتری بودند اما از نظر میزان یکنواختی، نمونه شاهد تجاری از بالاترین میزان یکنواختی در میان نمونه‌ها برخوردار بوده و نمونه NFC100 در رتبه سوم قرار گرفت. از این‌رو اگرچه اندازه ذرات در نمونه شاهد تجاری افزایش یافته اما هنوز این نمونه در مقایسه با دو نمونه NFC100 و CC100، به عنوان نمونه مایونز با اندازه ذرات کوچک به حساب آمده که دارای بالاترین میزان یکنواختی در میان نمونه‌ها بوده است و توانسته بیشترین میزان ویسکوزیته ظاهری را به‌خود اختصاص دهد. نمونه حاوی 1%

کربوکسی‌متیل‌سلولز (CC100) نیز با داشتن بزرگترین و غیریکنواخت‌ترین اندازه ذرات، دارای کمترین میزان ویسکوزیته گردیده است. همچنین با توجه به وجود تفاوت معنادار میان نتایج توزیع اندازه ذرات نمونه حاوی کربوکسی‌متیل‌سلولز تنها و نمونه حاوی نانوفیبر سلولز- کربوکسی‌متیل‌سلولز، برقراری یک اینترکشن سینرژیستی میان دو هیدروکلوئید فوق نیز کاملاً مشهود می‌باشد. تصاویر تهیه شده از نمونه‌های مایونز با میکروسکوپ نوری در شکل (5) به همراه نتایج حاصل از آزمون توزیع اندازه ذرات می‌تواند در بررسی اندازه قطرات، مقدار یکنواختی آنها در امولسیون و تخمین میزان مدول الاستیک و ویسکوزیته ظاهری نمونه‌ها بسیار مفید باشد. بر اساس تصاویر میکروسکوپی شکل (5)، تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه حاوی 1% کربوکسی‌متیل‌سلولز در تصویر (3) دارای ساختار متراکم‌تر و نهایتاً G' بزرگتری بودند. طبق این نتایج می‌توان اظهار کرد که تجمعات متراکم قطرات روغن در شبکه امولسیونی مسئول ویژگی‌های الاستیک و مقاومت امولسیون در برابر تغییر شکل می‌باشد (Liu *et al*., 2007). همچنین تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های مایونز کم‌چربی تاییدکننده نتایج آزمون اندازه ذرات بوده است. به‌طوریکه از مقایسه تصاویر می‌توان دریافت که تصویر (2) نشان‌دهنده کوچکترین اندازه ذرات در نمونه حاوی 0/5% نانوفیبر سلولز- 0/5% کربوکسی‌متیل‌سلولز بوده و بعد از آن اندازه ذرات به ترتیب در تصویر (4) مربوط به نمونه شاهد تجاری، تصویر (1) مربوط به نمونه 1% نانوفیبرسلولز و تصویر (3) مربوط به نمونه 1% کربوکسی‌متیل‌سلولز افزایش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود اندازه ذرات در تصاویر (1) و (3) نسبت به تصاویر (2) و (4) بزرگتر شده اما میزان یکنواختی ذرات در تصویر (1) به مقدار زیادی حفظ گردیده است. در حالیکه علاوه بر اندازه ذرات، میزان تفاوت در اندازه ذرات و غیریکنواختی آنها نیز در تصویر (3) به حداکثر خود رسیده و تاییدکننده کاهش میزان ویسکوزیته ظاهری در نمونه حاوی 1% کربوکسی‌متیل‌سلولز بوده است.

نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج حاصله از آزمون‌ها و تفسیر آنها در بخش‌های پیشین، با افزودن نانوفیبر سلولز به همراه کربوکسی‌متیل‌سلولز، شاخص ویسکوزیته نزدیکترین مقدار را به نمونه شاهد تجاری نشان داده و فاکتور D[4,3] ذرات نسبت به نمونه شاهد تجاری برتری معناداری داشته است ($p<0/05$). تمامی ویژگی‌های رئولوژیکی مورد بررسی نیز در بهترین سطح بوده و تفاوت معنی‌داری با نمونه شاهد تجاری نشان ندادند ($p>0/05$). همچنین مدول الاستیک بر مدول ویسکوز ($G'>G''$) غالب بوده که بیانگر تقویت ویژگی‌های الاستیک در آن و مشابه روند در نمونه شاهد تجاری بوده است. با توجه به نتایج حاصله، نمونه NFC50/CC50 (حاوی 0/5% نانوفیبر سلولز– 0/5% کربوکسی‌متیل‌سلولز) به‌عنوان نمونه مایونز کم‌چربی برگزیده با ویژگی‌های رئولوژیکی و اندازه ذرات برتر در این پژوهش معرفی گردید.

منابع

Ahola, S., 2008, Properties and interfacial behavour of cellulose nanofibril. Doctora Thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, *Finland*, 42-47.

Alimi, M., Mizani, M., Naderi, G., Mortazavian, A.M., Bameni Moghadam, M., 2013, Development of low-fat mayonnaise containing combined mixtures of different types of inulin. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(1), 99-104.

Bogati, D. R., 2011, Cellulose Based Biochemicals and their applications. Bachelor’s Thesis, Saimaa University of Applied Sciences, Imatra, *Finland*, 25-30.

Choonhahirun, A., 2008, Influence of added water and konjac flour as fat replacer on some quality characteristics of celery mayonnaise. *Journal of Assumption University of Thailand*, 11(3), 154-158.

Coffey, D. G., Bell, D. A., Henderson, A., 2006, Cellulose and Cellulose Derivatives, In: Stephen, A. M., Philips, G. O., Williams, P. A, ed, *The Food Polysaccharides and Their Applications*, 2th edn, CRC Press, Florida, 146-179.

Eronen, P., Junka, K., Haggblom, M., Laine, J., Osterberg, M., 2010, Polysaccharide interactions with nanocellulose as a platform for biomimetic modifications. In: Proceeding of International Conference on Nanotechnology for the Forest Products Industry, TAPPI Press, *Georgia*, 1099-1122.

Gutierrez, X., Siliva, F., Chirinos, M., Leiva, J., Rivas, H., 2002, Bitumen-in-water emulsion: an overview on formation, Stability and rheological properties. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 23, 405-418.

Izidoro, D. R., Scheer, A. P., Sierakowski, M. R., Haminiuk, C.W., 2008, Influence of green banana pulp on the rheological behaviour and chemical characteristics of emulsions (mayonnaises). *Journal of LWT-Food Science Technology*, 41, 1018-1028.

Kalashnikova, I., Bizot, H., Cathala, B., Capron, I., 2012, Modulation of cellulose nanocrystals amphiphilic properties to stabilize oil/water interface. *Journal of Biomacromolecules*, 13, 267-275.

Langton, M., Jordansson, E., Altskar, A., Sorensen, C., Hermansson, A., 1999, Microstructure and image analysis of

mayonnaises. *Journal of Food Hydrocolloids*, 13, 113-125.
Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A., Bras, J., 2012, Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Journal of Carbohydrate Polymers*, 90, 735-764.
Liu, H., Xu, X. M., Guo, S. D., 2007, Rheological, texture and sensory properties of low-fat mayonnaise with different fat mimetics. *Journal of LWT-Food Science Technology*, 40, 946-954.
Lorenzo, G., Zaritzky, N., Califano, A., 2008, Modeling rheological properties of low-in-fat o/w emulsions stabilized with xanthan/guar mixtures. *Journal of Food Research International*, 41, 487- 494.
Ma, L., Barbosa-Canovas, G.V, 1995, Rheological characterization of mayonnaise. Part II: Flow and viscoelastic properties at different oil and xanthan gum concentrations. *Journal of Food Engineering*, 25, 409-425.
Mancini, F., Montanari, L., Peressini, D., Fantozzi, P., 2002, Influence of alginate concentration and molecular weight on functional propertiesof mayonnaise. *Journal of Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie*, 35, 517–525.
McClements, D. J. 2005. Food Emulsions; Principles, Practice, and Techniques. 2th edn, CRC Press, Florida, 533-543.
McGinley, E. J., Venables, A. C., Krawczyk, G. R., 1997, A cellulose composition, its preparation, and its use in foods. W.O. *Patent* No. 1997045024 A1.
Mun, S., Kim, Y. L., Kang, C. G., Park, K. H., Shim, J. Y., Kim, Y. R., 2009, Development of reduced-fat mayonnaise using 4GTase-modified rice starch and xanthan gum. *Journal of Biomacromolecules*, 44, 400-407.
Nikzade, V., Tehrani, M. M., Saadatmand-Tarzjan, M., 2012, Optimization of low-cholesterol low fat mayonnaise formulation: Effect of using soy milk and some stabilizer by a mixture design approach. *Journal of Food Hydrocolloids*, 28, 344-352.
Paakko, M., Ankerfors, M., Kosonen, H., Nykanen, A., Ahola, S., Osterberg, M., Ruokolinen, J., Laine, J., Larsson, P. T., Ikkala, J., Lindstrom, T., 2007. Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. *Journal of Biomacromolecules*, 8(6), 1934–1941.
Quintana, J. M., Califano, A. N., Zaritzky, N. E., Partal, P., 2002, Effect of salt on the rheological properties of low-in-fat O/W emulsions stabilized with polysaccharides. *Journal of Food Science and Technology International*, 8(4), 213-221.
Rajah, K. K. 2002. Fats in Food Technology. Sheffield Academic Press, Sheffield, 256-260.
Su, H. P., Lien, C. P., Lee, T. A., Ho, R. S., 2010, Development of low- fat mayonnaise containing polysaccharide gums as functional ingredients. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 90, 806-812.
Thomareis, A. S., Chatziantoniou, A., 2011, Evaluation of the consistency of low-fat mayonnaise by squeezing flow viscometry. *Journal of Procedia Food Science*, 1, 1997-2002.
Winuprasith, T., Suphantharika, M., 2015, Properties and stability of oil-in-water emulsions stabilized by microfibrillated cellulose from mangosteen rind. *Journal of Food Hydrocolloids*, 43, 690-699.
Worrasinchai, S., Suphantharika, M., Pinjai, S., Jamnong, P., 2006, -Glucan prepared from spent brewer´s yeast as a fat replacer in mayonnaise. *Journal of Food Hydrocolloids*, 20, 68-78.
Yousefi, H., Nishino, T., Faezipour, M., Ebrahimi, G. H., Shakeri, A., 2011, Direct fabrication of all-cellulose nanocomposite from cellulose microfibers using ionic liquid-based nanowelding. *Journal of Biomacromolecules*, 12, 4080-4085.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 13, No. 4, Oct- Nov 2017, p. 446-457

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 13، شماره 4، مهر - آبان 1396، ص. 457-446

Evaluation of the effect of nanofiber cellulose and carboxy methyl cellulose on rheological properties and particle size of low-fat mayonnaise

L. Golchoobi[1], M. Alimi*[2], H. Yousefi[3]

Received: 2015.10.12
Accepted: 2016.02.15

Introduction: Mayonnaise, a semisolid oil in water emulsion containing vegetable oil, vinegar, egg yolk and optional ingredients such as salt, sugar and mustard, is a conventional old condiment containing high fat ingredient (minimum of 65%). The need to reduce the amount of saturated fat in diets, has led to the development of alternative processes to produce law fat mayonnaise. Cellulose and its physically-treated derivatives i.e. microcrystalline cellulose (MCC) and microfibrillated cellulose (MFC) lately investigated as NFC is one of the conventional fat replacers used in low-fat products formulation such as mayonnaise. Nanofiber cellulose (NFC) is a glucose polymer connecting together by β (1-4) glycosidic bonds. This low-cost new kind of cellulose can be obtained from physical modification of cellulose as naturally occurring carbohydrate that is renewable, biodegradable and nontoxic. Increased specific surface area, enhanced mechanical and hydrophilic properties of nanoscale cellulose are affected by the number of hydrogen bond in nanofiber chain of cellulose and low concentration of NFC suspension can form a stront and viscous semi-gel network. As a result, because of all the functional properties, NFC can be employed as a fat replacer in reduced or low calorie food products, and as an improver of the product structure consistency. In fact, because of downsizing cellulose to nanoscale, the surface to volume ratio of NFC increases and the surface hydroxyl groups participate in the formation of hydrogen bonds in the network. Hence, more appropriate mechanical properties for NFC are achieved, even in a lower dosage. Therefore, NFC is theoretically a proper thickener and stabilizer for low-fat systems. Carboxy methyl cellulose (CMC) is a synthesized derivate of cellulose which is gained by adding carboxy methyl groups (- CH2- COOH) to cellulose. CMC is used in different food systems with the E number E466 as emulsions stabilizer, control and modification of texture in various products. In this research, application of combination of nanofiber cellulose (0%-1%) and CMC (0%-1%) to optimize rheological properties and production of low-fat mayonnaise (30% oil) with desirable characteristics were studied. Due to the hydrophilic nature of cellulose derivatives, several research works have been focused on the stabilization of oil-in-water (o/w) emulsions specially salad dressing or low-fat and fat free mayonnaise by NFC. However, no information is available on NFC/CMC mixtures. The main aim of this study was to investigate the possible mutual interactions between NFC and CMC in mayonnaise formulation regarding to the nutritional benefits that each can be individually contribute to low-fat healthy products. Rheological characterization and particle size of low fat mayonnaise, containing NFC and CMC, were conducted to validate the practical applicability of the proposed formulation in food industry.

Materials and methods: The nanofiber cellulose of each formulation (0.25, 0.5, 0.75 and 1%) was first mixed with the related formulation water and pasteurized using a EUROSTAR power control-visc 6000 homogenizer for 5 min inside water bath at 85$^{\circ C}$. Then, it was added to the raw materials of its treatment. After production of 5 samples, viscosity test was performed using a rotational viscometer. Then, particle size measurement (D[4,3] with distilled water as the solvent, a Mastersizer 2000 equipped to quartz cell and laser beam with λ= 634 nm), light microscopy (optical microscope, magnification of 100×) and rheological tests such as flow behavior (shear rate: 0.01-200 1/s), complex viscosity and frequency sweep (frequency: 0.01-100 Hz) were performed on 3 selected samples (stress-controlled rheometer with a serrated parallel-plate geometry). Commercial low fat mayonnaise (30% fat) produced by Behrouz factory was selected as the control sample.

1 And 2. M. Sc. Graduate and Assistant Professor, Food Science and Technology, Science and Research Ayatoolah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
(*Corresponding Author Email: Ahooora_mazdak@yahoo.com)

Results & discussion: Overall, the viscosity results revealed that by the addition of NFC and CMC, only the sample containing 0.5% nanofiber cellulose and 0.5% CMC did not show significant difference compared to the commercial control sample ($p<0.05$). The results of flow behavior test of low-fat mayonnaise samples show a non-newtonian and pseudoplastic behavior in all samples. The obtained results of data fitting with Herschel-Buckley model indicated that the addition of NFC together with CMC did not significantly alter the flow behavior index, consistency coefficient and yield stress. Moreover, in frequency sweep test for selected samples containing NFC and CMC, the trend of changes in elastic modulus were higher than viscose modulus ($G'>G''$) that has revealed the predominating of the elastic features in the mentioned samples, similar to the trend of commercial control sample. The obtained data of complex viscosity was in consistency with this data. With respect to the obtained results of particle size distribution, the sample containing 0.5% nanofiber cellulose and 0.5% CMC were considered to have the minimum value of D[4,3] and desirable uniformity in comparison with other samples.

Conclusion: Considering the aforementioned results, in this study NFC50/CC50 sample containing 0.5% nanofiber cellulose and 0.5% CMC was employed to formulate low-fat mayonnaise with interesting particle size and rheological properties that is attributed to the synergistic interaction between 0.5% NFC and 0.5% CMC. In fact, the effect of fat reduction is balanced by replacing of 0.5% nanofiber cellulose and 0.5% CMC. Therefore, these hydrocolloids generated a robust gel-structure in the network of this sample. In addition, tridimensional gel structure was formed by physical entanglements among polymeric chains along with the development of the crosslinked network formed between both hydrocolloids. On the other hand, reduction of dispersion phase size and suitable uniformity of droplets in NFC50/CC50 sample resulted in appropriate monodispersity, which increases the resistance to deformation and the enhancement of its viscosity.

Keywords: Nanofiber cellulose, Carboxy methyl cellulose, Low-fat mayonnaise, Rheological properties, Particle size.